

# BepiColombo - Zur Genese eines Weltraumprojektes

Glaßmeier, Karl-Heinz

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 2007 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.81-91



J. Cramer Verlag, Braunschweig

## **BepiColombo - Zur Genese eines Weltraumprojektes\***

KARL-HEINZ GLAßMEIER

Technische Universität Braunschweig  
Mendelssohnstraße 2-3, D-38106 Braunschweig

Reisen in den Weltraum sind nicht nur weite Reisen, sondern fordern auch Zeit. Für den Sommer 2013 planen die europäische Weltraumagentur ESA und ihr japanischer Partner JAXA den Start zweier Satelliten, die sechs Jahre später in eine Umlaufbahn um den Planeten Merkur einschwenken sollen, um dort mindestens zwei Jahre den der Sonne nächsten Planeten unseres Sonnensystems wissenschaftlich zu erkunden. Die ersten Planungen für dieses Projekt gehen auf Überlegungen Mitte der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts zurück. Wenn also die BepiColombo-Raumschiffe 2021 ihre Mission erfüllt haben, dann sind mehr als 30 Jahre vergangen, während derer sich die europäische Wissenschaftsgemeinde mit der Planung und Realisierung einer Merkurmission beschäftigt hat. Die BepiColombo-Mission ist somit ein Beispiel wissenschaftlicher Großforschung, für das nicht nur politische und finanzielle, wissenschaftliche und technische Probleme zu lösen waren, sondern für das auch über mindestens eine Wissenschaftlergeneration hinweg Kontinuität in der Projektentwicklung zu fordern ist.

### **Der Planet Merkur**

Diese kurze Abhandlung soll ein Beitrag sein zur Darstellung der Genese des BepiColombo-Projektes, seiner wissenschaftlichen Ziele und Durchführung. Zuvor gilt es jedoch, das „Objekt der Begierde“, den Planeten Merkur kurz vorzustellen. Mit einem Radius von 2439 km ist Merkur etwa halb so groß wie unsere Erde. Er umläuft auf einer stark elliptischen Bahn die Sonne mit einem Perihel von 0.31 AE (1 astronomische Einheit = 1 AE = 149597 km) und einem Aphel von 0.47 AE. Die siderische Umlaufperiode beträgt 87.96 Erdtage und die Eigenrotationsrate 58.64 Erdtage: Merkur befindet sich in einer so genannten 2/3 Resonanz, d.h. der Planet dreht sich dreimal um sich selber während er zweimal die Sonne umläuft. Diese resonante Kopplung zwischen Eigendrehung

---

\* Kurzfassung des am 12.10.2007 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrags.

und Bahndrehung wurde erstmals von dem italienischen Astrophysiker Giuseppe Colombo (1920-1984) genauer untersucht, weshalb die ESA ihre Merkurmission ihm zu Ehren BepiColombo nannte.

Eine weitere Auffälligkeit Merkurs ist seine große Massendichte,  $5.42 \text{ g/cm}^3$ ; der terrestrische Wert liegt bei  $5.5 \text{ g/cm}^3$ . Nimmt man einen Stein in die Hand, z.B. einen Brockengranit, so hat dieser eine Dichte von etwa  $2.8 \text{ g/cm}^3$ . Die deutliche Diskrepanz zwischen Oberflächendichte und mittlerer Dichte deutet auf die Existenz eines schweren, eisenhaltigen Kerns hin. Theoretische Überlegungen berechtigen zu der Vermutung, auch der Merkur habe einen solchen Planetenkern. Er weist nach heutigem Wissen einen Radius von 1860 km auf, ist im Verhältnis zum Radius des ganzen Planeten deutlich größer als der Erdkern. Die Ursache hierfür ist nicht bekannt.

Aufgrund seines geringen Durchmessers ist Merkur ein Leichtgewicht unter den Planeten und bringt es nur auf etwa 5% der Masse der Erde. Das Schwerfeld ist daher entsprechend schwach und die Schwerkraft an der Oberfläche beträgt nur  $2.78 \text{ m/s}^2$ . Das Fehlen einer signifikanten Atmosphäre wundert daher nicht, denn atmosphärische Gase können gravitativ nicht an den Planeten gebunden werden. In dieser Hinsicht gleicht Merkur dem Erdmond und entsprechend ist auch die Oberfläche Merkurs durch eine Vielzahl von Einschlagskratern charakterisiert, da die Oberfläche einerseits nicht durch eine Atmosphäre vor dem kosmischen Bombardement geschützt ist und andererseits kaum Verwitterungsprozesse stattfinden, die Oberflächenstrukturen verändern. Die starke Bekraterung muss aber auch als Hinweise auf das Fehlen von der terrestrischen Plattentektonik vergleichbaren Prozessen im Inneren des Planeten gedeutet werden.

Als im 1974/1975 Merkur erstmalig von einem Raumschiff, der NASA Sonde Mariner 10, besucht wurde, war die Entdeckung eines planetaren Magnetfeldes eine große Überraschung, wenn nicht eine wissenschaftliche Sensation (NESS u.a., 1974). Aufgrund der geringen Größe und der kleinen Rotationsrate ging man damals vielfach davon aus, Merkur sei in seinem Inneren wegen der großen Wärmeverluste erkaltet und könne auch keinen Dynamoprozess unterstützen. Um einen solchen Prozess zu ermöglichen, benötigt man im Planeten einen möglichst großen Bereich, in dem elektrisch leitfähiges Material sich rasch bewegen kann. Vorteilhaft sind weiterhin eine differentielle Rotation und bedeutsame Corioliskräfte. All diese Bedingungen schien Merkur nicht erfüllen zu können. Der amerikanische Weltraumpionier Norman Ness, in den sechziger Jahren am Aufbau der Weltraumphysik an der Technischen Universität Braunschweig beteiligt, setzte jedoch den Primat des Experimentes vor den der Theorie und erwirkte den Einsatz eines Magnetometers auf der Mariner 10 Sonde.

Mit etwa 340 nT ist das Feld Merkurs am dortigen Äquator jedoch sehr schwach, hundert Mal kleiner als das terrestrische Feld. Allerdings ist es doch stark ge-

nug, eine klassische Magnetosphäre aufzubauen. Als Magnetosphäre bezeichnet man die Wechselwirkungsregion zwischen dem Sonnenwind und einem Planeten. Könnte man eine solche Magnetosphäre sehen, sähe sie wie ein Kometenschweif aus. Auf der Tagseite wird das planetare Magnetfeld gestaucht, auf der Nachtseite weit in den interplanetaren Raum hinausgezogen. Die Grenze zwischen Magnetosphäre und dem Sonnenwindplasma bildet die Magnetopause. In ihre fließen im Falle Merkurs elektrische Ströme mit einer Stärke von etwa  $10^6$  A (GLAßMEIER u.a., 2007). Der Abstand der Magnetopause zur Oberfläche Merkurs ist sehr variabel und beträgt im Mittel nur 1700 km, nur ein Vierzigstel des terrestrischen Wertes. Hin und wieder kann es auch vorkommen, dass die Magnetopause die Planetenoberfläche erreicht. Dann ist Merkur dem Wirken des zwar sehr dünnen, aber heißen Plasmas des Sonnenwindes ausgesetzt, da die schützende Atmosphäre fehlt.

### Die BepiColombo Mission

Wissenschaftliches Ziel der BepiColombo Mission (BALOGH u.a., 2007) ist die Erforschung der inneren Struktur und Dynamik Merkurs, seiner stofflichen Zusammensetzung, der Geologie der Oberfläche und der Wechselwirkung mit dem interplanetaren Medium nahe der Sonne. In welcher Weise dieser sonnennächste Planet entstanden ist und wie er sich entwickelt hat, das ist eine der drängenden Fragen der Planetenforschung. Aus diesem Grunde hat die ESA 1998 beschlossen, gemeinsam mit der japanischen Raumfahrtagentur JAXA zwei Satelliten in elliptische Umlaufbahnen um Merkur zu bringen und dort umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen anzustellen. Der japanische Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) hat als primäres Ziel die Erforschung der Magnetosphäre Merkurs und soll auf eine polare Umlaufbahn mit einem Perihelium von 400 km Höhe und einem Apohelium von 12000 km Höhe gebracht werden. MMO ist mit Messinstrumenten z.B. zur Bestimmung des Magnetfeldes Merkurs und der Eigenschaften des Plasmas und des Neutralgases in seiner Umgebung ausgestattet. Der europäische Mercury Planetary Orbiter (MPO) trägt ebenfalls eine Vielzahl von Instrumenten, diverse Kameras, die es erlauben, die Oberfläche Merkurs in verschiedenen Spektralbereichen und mit unterschiedlicher Auflösung zu photographieren, ein Laser Altimeter zur Vermessung der Oberflächentopologie, ein Magnetometer und ein Instrument zur Bestimmung des Schwerfeldes Merkurs. MPO wird ebenfalls auf eine polare Umlaufbahn gebracht; Perihelium bzw. Apohelium werden in einer Höhe von 400 bzw. 1500 km sein.

Eines der größten technischen Probleme des BepiColombo Projektes sind die sehr rauen Umfeldbedingungen nahe der Sonne. Tagseitig herrschen auf der Merkuroberfläche Temperaturen von über  $400^{\circ}\text{C}$ ; nachtseitig sinken sie auf  $-173^{\circ}\text{C}$  ab. Die solare Energieeinstrahlung ist etwa zehnmal größer als nahe der

Erde. Auf der sonnenzugewandten Seite sind die Raumfahrzeuge daher mit Hitzeschilden ausgestattet. Umfangreiche thermische Studien für die Sonden, aber auch für die einzelnen Instrumente werden durchgeführt, um ein Instrumentendesign zu finden, dass es auch erlaubt, die aufgenommene Strahlungsenergie auf der sonnenabgewandten Seite wieder in den Wellraum abzugeben. Beide Sonden sollen im Sommer 2013 von Kourou aus gestartet werden und nach sechs Jahren Flugzeit Merkur erreichen. Die nominale Missionsdauer wird zwei Jahre betragen.

### ESA und der Weg zu BepiColombo

Die europäische Weltraumagentur ESA wurde 1975 als unabhängige Organisation mit zurzeit 17 Mitgliedsstaaten, darunter die Bundesrepublik Deutschland, gegründet. Sie wird von einem zehnköpfigen Direktorium unter dem Vorsitz eines Director General geleitet. Die einzelnen Direktorate sind für Bereiche wie Startbetrieb, Bemannter Raumflug, Erdbeobachtung oder Wissenschaft zuständig. Oberstes Aufsichtsgremium ist die Konferenz der Wissenschaftsminister der Mitgliedsländer. Als weitere Aufsichtsgremien agieren fünf zusätzliche Kommissionen, darunter das für die Planung der wissenschaftlichen Missionen zuständige Science Programme Committee (SPC), dem Vertreter der Wissenschaft und der nationalen Raumfahrtagenturen angehören. Dem SPC arbeitet das Space Science Advisory Committee (SSAC) zu, dem Wissenschaftler aus den Mitgliedsländern angehören. Die SSAC Mitglieder werden nach Konsultation der nationalen Agenturen und der *scientific community* von der ESA berufen. Um die unterschiedlichen wissenschaftlichen Interessen in den Bereichen Astronomie und Astrophysik, Erforschung der Sonne und des Sonnensystems sowie Grundlagen der Physik berücksichtigen zu können, wird die ESA und ihr *Director of Science* durch die Solar System Working Group (SSWG), die Astronomy Working Group (AWG) und die Fundamental Science Working Group (FSWG) beraten. Diesen Arbeitsgruppen gehören ausschließlich Wissenschaftler an, die für drei Jahre von der ESA berufen werden; die Leitung der Arbeitsgruppen obliegt ebenfalls einem Wissenschaftler. Auch wenn letztendlich Entscheidungen beim *Director of Science* liegen, spielen die Arbeitsgruppen eine sehr große Rolle bei der Planung der wissenschaftlichen Aktivitäten der ESA und gewährleisten ein hohes Maß demokratischer Kontrolle.

Das Hauptquartier der ESA ist in Paris, weitere Standorte sind Noordwijk (Technologiezentrum), Darmstadt (Operationszentrum für die Missionen), Frascati (Zentrum für die Erdbeobachtung), Villafranca (Astronomiezentrum), Köln (Europäisches Astronautenkorps) und Kourou (Weltraumbahnhof). Die wissenschaftlichen Aktivitäten der ESA sind wesentlich durch die Langzeitprogramme *Horizon 2000+* und *Cosmic Vision 2020* geprägt. Das Horizon 2000 Programm

wurde nach umfangreichen Konsultationen mit der *scientific community* 1984 ins Leben gerufen. Es sieht als Eckpfeiler mehrere große Weltraummissionen, *cornerstones*, vor, zu denen unter anderen die Kometenmission Rosetta, die Soho/Cluster-Mission zur Erforschung der Sonne und der Erdmagnetosphäre und die BepiColombo-Mission gehören. An allen drei genannten Missionen ist die Technische Universität Braunschweig in größerem Maße beteiligt. Die Gesamtkosten eines *cornerstones* liegen bei etwa 700 Millionen €. Zusätzlich zu diesen Eckpfeilern sind im Rahmen von *Horizon 2000+* noch weitere mittlere Missionen durchgeführt worden bzw. werden gerade durchgeführt. Diese M-Missionen haben ein deutlich kleineres Finanzvolumen.

Am Anfang der Planung eines Programms wie *Horizon 2000+* und seiner Missionselemente steht für gewöhnlich ein *Call for Ideas*, in dem die ESA die *scientific community* auffordert, Ideen für neue Weltraumprojekte vorzulegen. Auf einen solchen Aufruf gehen dann 40-50 Vorschläge unterschiedlichster Art ein. Ein sehr detaillierter Vorschlag für eine Merkurmission, an dem auch der Verfasser beteiligt war, wurde der ESA in diesem Rahmen bereits 1986 gemacht. Aus den eingegangenen Vorschlägen sucht dann ein internationales Gutachterkomitee gemeinsam mit den Beratungsgremien der ESA diejenigen Projekte aus, die in einer so genannten *Assessment-Studie* auf ihre technische und finanzielle Machbarkeit hin genauer untersucht werden. Für gewöhnlich sind mehrere vorgeschlagene Mission machbar, so dass in einem weiteren Begutachtungsprozess geklärt werden muss, welche der diskutierten Missionen, ob und in welchem Programmentelement realisiert werden kann. So stand z.B. die Soho/Cluster-Mission 1985 in deutlicher Konkurrenz zur ebenfalls vorgeschlagenen Kepler-Mission zur Untersuchung der Atmosphäre unseres Nachbarplaneten Mars.

1993 erfolgte ein weiterer Vorstoß, eine europäische Merkurmission zu realisieren. Für eine der mittleren Missionen des *Horizon 2000+* Programms, die M3-Mission, wurde von einer Gruppe europäischer Planetologen wieder eine Mission zu dem sonnennächsten Planeten ins Gespräch gebracht. Eine detaillierte *Assessment-Studie* machte jedoch deutlich, dass in dem möglichen finanziellen Rahmen einer M-Mission ein Merkurprojekt nicht machbar war, sondern nur im Rahmen eines *Cornerstones* zu verwirklichen ist. Alle Anstrengungen konzentrierten sich in den Folgejahren auf den 5. *Cornerstone* des ESA-Programms. Mehrere internationale Workshops wurden organisiert, um die sehr hohe wissenschaftliche Bedeutung einer Merkurmission herauszuarbeiten und den Beratungsgremien der ESA nahe zu bringen. Treibende Kraft dieser Aktivitäten war der britische Weltraumforscher Andre Balogh von Imperial College. 2000 war es dann soweit – die ESA beschloss eine Merkurmission als 5. *Cornerstone* in ihr *Horizon 2000+* Programm aufzunehmen. Die vorgeschlagenen Mission sollte drei Elemente beinhalten: einen Orbiter zur Untersuchung der Magnetosphäre, einen planetaren Orbiter und ein *Mercury Surface Element*, eine Landegerät zur in-situ Untersuchung der Oberfläche Merkurs.

Für alle drei Missionselemente hatten die Beratungsgremien eine Modellnutzlast vorgeschlagen, d.h. genaue Vorstellungen erarbeitet, welche wissenschaftlichen Experimente die drei Raumschiffe tragen sollten. Weitere politische Konsultationen folgten und zeitweise wurde die BepiColombo Mission wieder in Frage gestellt. Auf einem Treffen der Wissenschaftsminister der ESA-Mitgliedsstaaten im Mai 2002 wurde dann endlich die letzte Weiche gestellt und BepiColombo als Mission in das neue ESA-Programm Cosmic Vision 2020 aufgenommen. Im Sommer 2003 erfolgte dann das *Announcement of Opportunity*, die internationale Ausschreibung für die wissenschaftlichen Experimente. BepiColombo hatte aber Federn lassen müssen, denn das *Mercury Surface Element* war aus technischen und finanziellen Gründen wieder aus dem Programm genommen worden.

### **BepiColombos Magnetfeldexperiment**

Weltraumexperimente erfordern einen hohen finanziellen Aufwand. Als Faustregel liegen die Kosten bei etwa 4 Millionen € pro Kilogramm Nutzlast. Mit allen Komponenten, Sensor, Leistungsversorgung und Bordrechner, muss für ein modernes Magnetometerexperiment mit einer Masse von 1500 g gerechnet werden. Die erforderlichen Geldmittel lassen sich daher nicht ohne weiteres von einer Experimentatorengruppe aufbringen. Deshalb werden in der Regel internationale Konsortien gebildet, die sich die erforderlichen Entwicklungs- und Fertigungsarbeiten und deren Finanzierung teilen. Ein solches Konsortium wird von einem *Principal Investigator* geleitet. Für die BepiColombo Mission bildeten bereits 1998 das Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik der Technischen Universität Braunschweig, das Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Graz und das Space and Atmospheric Physics Laboratory des Imperial College in London das MERMAG Konsortium. Innerhalb dieses Konsortiums sollten Andre Balogh vom Imperial College und Wolfgang Baumjohann aus Graz die Leitung der Experimentgruppen für die Magnetometerexperimente auf dem planetaren Orbiter bzw. dem magnetosphärischen Orbiter übernehmen. Für das Magnetometerexperiment des *Mercury Surface Element* sollte zunächst der Verfasser die Rolle des Principal Investigator übernehmen, eine Rolle die dann aber obsolet wurde, da dieses Missionselement gestrichen worden war.

Das MERMAG Konsortium lieferte termingerecht zum Februar 2004 seinen Experimentvorschlag ab. Ein solcher Vorschlag ist sehr umfangreich, umfasste im Falle BepiColombos etwa 1000 Seiten und beschreibt äußerst detailliert das vorgeschlagene Experiment. Anders als z.B. für die Vorbereitung eines Antrages für einen Sonderforschungsbereich an die Deutsche Forschungsgemeinschaft gibt es seitens der Technischen Universität Braunschweig oder des Landes Niedersachsen keine Sondermittel für die Erarbeitung eines solchen Antrages. Der

Bewerbung vorausgegangen war eine intensive Begutachtung der jeweiligen nationalen Beistellungen durch ihre nationalen Geldgeber, in Deutschland dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Bonn. Denn Voraussetzung der Bewerbung war eine Absichtserklärung der zuständigen nationalen Agentur, im Falle einer Auswahl gegebenenfalls die Finanzierung zu übernehmen.

Zwei weitere Konsortien hatten sich unter französischer und dänischer Leitung gebildet und schlugen ebenfalls für die Magnetometerexperimente auf den MPO und MMO Satelliten vor. Alle eingegangenen Experimentvorschläge wurden einer internationalen Begutachtung zugeführt. Die Experimentauswahl erfolgte im Januar 2005. Den Zuschlag erhielt das MERMAG Konsortium. Allerdings regte sich Protest. Über ihren Repräsentanten im Science Programme Committee der ESA meldete die dänische Regierung Bedenken gegen die Auswahlentscheidung des ESA Gutachtergremiums an, ein pikanter Protest, waren doch der vorschlagende *Principal Investigator* und der dänische Vertreter im SPC ein und dieselbe Person.

Die Kritik richtete sich vor allem gegen das vom MERMAG Konsortium vorgeschlagene Konzept der Magnetischen Reinheit. Magnetfeldmessungen im Welt- raum werden stark durch magnetische Materialien an Bord der Raumsonde oder elektrische Ströme dort beeinflusst. Daher werden Magnetometersensoren in der Regel auf langen Auslegern montiert, um den erforderlichen Abstand zu den Störquellen zu haben. Solche Ausleger sind aber technisch nicht unproblematisch und ihre Länge häufig begrenzt. Bereits im Rahmen der Giotto Mission zum Kometen P/Halley hatte die braunschweigische Gruppe gezeigt, dass auch mit sehr kurzem Ausleger Methoden entwickelt werden können, um eine ausreichende Magnetische Reinheit zu gewährleisten. Sehr erfolgreich werden diese Methoden z.B. bei der zurzeit laufenden VenusExpress Mission oder dem Rosetta Lander Magnetometer von Hans-Ulrich Auster verwendet (AUSTER u.a., 2007). Aufgrund des Protestes musste das MERMAG Konsortium im März 2005 unter Offenlegung vieler technischer Details das eigene Konzept in Noordwijk den konkurrierenden Konsortien präsentieren und verteidigen. Im Ergebnis bestätigte die ESA ihre Auswahl nach dieser Präsentation.

Im Mai 2005 zog die britische Raumfahrtagentur ihre zunächst erteilte Bereitschaft zur Finanzierung des *Principal Investigator* Teams um Andre Balogh vom Imperial College zurück. Da das Team der Technischen Universität Braunschweig ohnehin wesentliche Arbeitspakete für die beiden Magnetometerexperimente auf MPO und MMO übernommen hatte, beschloss das MERMAG Konsortium dem Verfasser die Aufgabe des *Principal Investigator* für das MPO Experiment zur übertragen. Dieser Entscheidung gingen jedoch Konsultationen mit dem DLR Bonn voraus, das sich bereit zeigte, die zusätzlichen Kosten zu übernehmen. Ein formaler und umfassender Antrag zur Finanzierung des



MPO Magnetometerexperiment wurde im Juli 2005 an das DLR gestellt und nach weiterer Begutachtung die Finanzierungszusage im Dezember 2005 erteilt.

Die experimentellen Arbeiten konnten begonnen werden. Die Aufgabe des Instrumentmanagers wurde Gerhard Berghofer vom Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Graz übertragen. Und Hans-Ulrich Auster von der Technischen Universität Braunschweig leitet seither die technische Entwicklung des MPO-Magnetometers als Chefingenieur. Die intensive Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe in Graz basiert auf während der Weltraummissionen Rosetta und VenusExpress gesammelten Erfahrungen. Im Vordergrund standen zunächst Fragen des Thermalhaushaltes des Magnetometersensors. Es gilt, die Sensortemperatur während aller Missionsphasen weitestgehend stabil zu halten. Dies erfordert umfangreiche Modellrechnungen zur solaren Insolation, der Rückstrahlung der extrem heißen Planetenoberfläche im Infraroten, der Abstrahlung auf der der Sonne abgewandten Seite des Sensors und des Thermalverhaltens während der Eklipsen, d.h. der Schattendurchgänge des Satelliten. Aufgrund dieser Modellrechnungen sieht das gegenwärtige Thermalkonzept vor, den Magnetometersensor im Temperaturbereich von etwa 180°-200° C zu betreiben. Mittlerweile wurde das Thermaldesign auch in der Weltraumkammer des Institute of Space and Astronautical Science der japanischen Weltraumagentur JAXA in Tokio ausgiebig getestet. Ein wissenschaftliches Experiment bei derart extremen Bedingungen zu operieren, bringt eine Reihe weiterer Probleme mit sich. So müssen geeignete Klebstoffe gefunden werden, die die erforderliche Haftung auch bei hohen Temperaturen gewährleisten, nicht ausgasen und dadurch andere Experimente stören und von der ESA als weltraumtauglich zertifiziert sind.

Im März 2006 trat unverhofft ein weiteres politisches Problem auf, als diesmal die französische Weltraumagentur CNES gegen die bereits vor Monaten erfolgte Experimentauswahl protestierte und eine erneute Begutachtung des Experimentvorschlages aus Braunschweig verlangte. Wieder waren Fragen zur Magnetischen Reinheit und der Länge des Experimentauslegers Ausgangspunkt des Protestes. In einer eilig anberaumten Sitzung mit hochrangigen Vertretern der ESA, der CNES und Wissenschaftlern aus Braunschweig konnten alle Bedenken der CNES ausgeräumt werden. Seither laufen die Entwicklungsarbeiten ungestört auf Hochtouren. In regelmäßigen Abständen muss sich das Team einer intensiven technischen Begutachtung der Projektingenieure der ESA stellen und zweimal im Jahr dem gesamten BepiColombo Wissenschaftlerteam über die Fortschritte berichten. Eine erste Veröffentlichung über den technischen Stand des MPO Fluxgate Magnetometerexperimentes mit weiteren Details zum Instrumentdesign wird demnächst erscheinen (GLAßMEIER u.a., 2008).

### Merkur – Ein rückgekoppelter Dynamo?

Während der langen Jahre der Experimententwicklung gibt es auch ausreichende Möglichkeiten, die zukünftige Datenauswertung vorzubereiten und theoretische Studien zu betreiben. Eines der interessantesten Probleme ist dabei die Frage des Merkurdynamos selber. Hatte man noch Mitte der 60er Jahre gedacht, dass im Inneren Merkurs kein Dynamoprozess ablaufen kann, legen heutige numerische Simulationen nahe, dass das dann tatsächlich beobachtete Feld um etwa einen Faktor 30 zu klein ist. Theoretisch sollte man in der Äquatorregion eine magnetische Flussdichte von 11000 nT erwarten, nicht 340 nT. Wie lässt sich dies erklären? Welche besondere Eigenschaft besitzt der Merkurdynamo?

Die physikalische Grundgleichung zur Erklärung des Dynamoprozesses ist die Induktionsgleichung

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B}) + \eta \Delta \vec{B}.$$

Hier bezeichnen  $\vec{B}$  und  $\vec{u}$  die magnetische Induktion und die Strömungsgeschwindigkeit in einem elektrisch leitfähigen Medium, z.B. dem planetaren Kern;  $\eta = 1 / \mu_0 \sigma$  ist die magnetische Diffusivität,  $\sigma$  die elektrische Leitfähigkeit des Mediums und  $\mu_0$  die Permeabilität des Vakuums. Der Term auf der linken Seite der Gleichung beschreibt die zeitliche Veränderung der magnetischen Induktion. Dieser Term sollte positiv sein, da es gilt, ein Saatfeld durch den Dynamoprozess zu verstärken. Der erste Term auf der rechten Seite ist der eigentliche Dynamoterm. Die Wechselwirkung zwischen dem strömenden Medium und der magnetischen Induktion führt zu einer lokalen Verstärkung des Feldes, die allerdings von der jeweiligen Feldstärke wieder abhängt. Der zweite Term arbeitet der Felderzeugung entgegen. Ein lokal erzeugtes Feld hat das Bestreben in seine Umgebung zu diffundieren, gleich einem Tintenklecks im Wasserglas. Die Effizienz dieser magnetischen Diffusion hängt von der elektrischen Leitfähigkeit ab. Ist diese sehr groß, dann kann die Diffusion vernachlässigt werden. Ein Dynamo kann daher effektiv nur in einem rasch strömenden Medium mit hoher elektrischer Leitfähigkeit stattfinden.

Verschiedene Vorschläge sind in den vergangenen Jahren gemacht worden, um das schwache Feld Merkurs zu erklären. CHRISTENSEN (2006) schlägt einen Dynamo vor, indem nur die innersten Schichten des Kerns an den Konvektionsprozessen beteiligt sind. Dies hat u.a. zur Folge, dass kleinräumige Strukturen des erzeugten Feldes, die höheren Multipolanteile, stärker zur Oberfläche hin abnehmen und nur noch die Dipol- und Quadrupolanteile messbar- und von Bedeutung sind.

Einen ganz anderen Ansatz verfolgen GLAßMEIER u.a. (2007). Wie eingangs erwähnt, fließen in der Grenzfläche zwischen dem Sonnenwind und der Magne-

tosphäre, der Magnetopause, starke elektrische Ströme. Im terrestrischen Fall erzeugen diese an der Planetenoberfläche ein Magnetfeld der Größenordnung 10 nT, vernachlässigbar im Vergleich zu den 30000 nT des dynamoerzeugten Feldes. Ganz anders bei Merkur: dem Dynamofeld von 340 nT steht ein durch Magnetopausenströme erzeugtes und nicht vernachlässigbares Feld von 50-60 nT gegenüber. Es muss also die Frage gestellt werden, welchen Einfluss dieses externe Feld auf den Dynamoprozess selber hat. In der Induktionsgleichung kann das externe Feld  $\vec{B}_{ext}$  durch einen entsprechenden Term berücksichtigt werden:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B} + \vec{u} \times \vec{B}_{ext}) + \eta \Delta \vec{B}.$$

Der zusätzliche Term beschreibt die Verstärkung der magnetischen Induktion durch die Wechselwirkung der Flüssigkeitsbewegung im Planeteninneren und dem externen Feld. Er hebt übrigens auch die Symmetrie  $\vec{B} \leftrightarrow -\vec{B}$  auf. Bedenkt man nun, dass das externe Feld aufgrund der Wechselwirkung des Planeten mit dem Sonnenwind entsteht, also das externe Feld vom dynamoerzeugten Feld abhängt,  $\vec{B}_{ext} = \vec{B}_{ext}(\vec{B})$ , und das externe Feld immer eine dem intern erzeugten Dynamofeld entgegen gesetzte Orientierung besitzt, so entsteht eine interessante negative Rückkopplungssituation. Zwei mögliche Lösungen hat dieser Feedback-Dynamo, wie Glaßmeier u.a. (2007) zeigen konnten. Die eine entspricht der terrestrischen Situation mit einem starken Dynamofeld und einem großen Magnetopausenabstand, der ein vernachlässigbares externes Feld zur Folge hat. Die andere entspricht eher der Merkursituation mit einem relativ starken externen Feld, das mit dem Dynamo rückkoppelt und das Gesamtfeld herabsetzt. Welche der verschiedenen Erklärungen für das schwache Merkurfeld letztendlich zutrifft, können nur intensive weitere theoretische Untersuchungen und detaillierte Magnetfeldmessungen in der Umgebung Merkurs entscheiden. BepiColombo wird hier einen entscheidenden Beitrag liefern.

## Konklusion

Weltraumprojekte wie das beschriebene BepiColombo-Projekt sind langfristige Projekte, die eine langfristige Perspektive auf Seiten der beteiligten Institutionen und Wissenschaftlergruppen erfordert. Die ESA selber stellt sich dieser Aufgabe und entwickelt zur Gewährleistung der Kontinuität in solchen Projekten spezielle Dokumentationsverfahren. Auf universitärer Seite ist dies schwieriger. Lange Jahre galten gerade Universitäten als Garant für die Kontinuität in solchen Projekten, da sie den kurzzeitigen Trends forschungspolitischer Aktivitäten nicht in dem Maße ausgeliefert zu sein schienen wie andere Institutionen. Die Erfahrungen in jüngster Zeit, z.B. Innovationspakete, Hochschuloptimierungsprogramme oder die noch ergebnisoffenen Diskussionen um die Errichtung einer Niedersächsischen Technischen Universität, deuten jedoch einen Paradigmenwechsel auch für die universitäre Forschung an.

Wissenschaftliches Arbeiten erfordert Geduld, nicht nur bei der experimentellen Arbeit oder dem theoretischen Durchdringen des zu erforschenden Gegenstandes, sondern auch in der Einwerbung der heute immer wichtiger werdenden Drittmittel. Das BepiColombo Projekt mag in einigen seiner Details, Laufzeit und Internationalität, außergewöhnlich sein, erscheint aber gerade deshalb geeignet, sich ändernde Rahmenbedingungen wissenschaftlicher Praxis aufzuzeigen. Angesichts abnehmender Grundfinanzierung wird die Drittmitteln unverzichtbarer Bestandteil jedes neuen wissenschaftlichen Projektes. Zu Tätigkeiten in Lehre und Forschung tritt zunehmend die Aufgabe der Akquise, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler werden zu sich selbst finanzierenden Unternehmerinnen und Unternehmern in staatlich kontrollierten Einrichtungen. Interne und externe Qualitätskontrolle wird dabei zunehmend über Förderrankings ausgeübt, die in der Regel dann finanzielle Förderungen durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft in den Fordergrund stellen, Drittmittel anderer Institutionen werden geringer geachtet. Deutlich zutage tritt dies z.B. in der übergebührlichen Beachtung von, durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichen, deren Zahl dann in der Öffentlichkeit als Indikator für die Exzellenz ganzer Universitäten herhalten muss. Das auch andere Projekte sich einem starken, vielleicht aufgrund ihrer Internationalität stärkeren Wettbewerb stellen müssen, dafür mag das vorgestellte BepiColombo Projekt ein Beispiel sein.

### Literaturhinweise

- AUSTER, H.U. u.a.: ROMAP: Rosetta Magnetometer and Plasma Monitor, Space Sci. Rev., 128, 221-240, 2007.
- BALOGH, A., R. GRARD, S. C. SOLOMON, R. SCHULZ, Y. LANGEVIN, Y. KASABA & M. FUJIMOTO: Missions to Mercury, Space Sci. Rev., 132, 611-645, 2007.
- CHRISTENSEN, U. R.: A deep dynamo generating Mercury's magnetic field, Nature, 444, 1056-1058, 2006.
- GLAßMEIER, K.H., H.U. AUSTER & U. MOTSCHMANN: A feedback dynamo generating Mercury's magnetic field, Geophys. Res. Lett., 34, L22201, doi:10.1029/2007GL031662, 2007.
- GLAßMEIER, K.H. u.a.: The Fluxgate Magnetometer of the BepiColombo Mercury Planetary Orbiter, Planet. Space Sci., zur Veröffentlichung eingereicht, 2008
- NESS, N.F., K.W. BEHANNON, R.P. LEPPING, Y.C. WHANG & K.H. SCHATTEN: Magnetic field observations near Mercury: preliminary results from Mariner 10, Science, 185, 151-160, 1974.